

東京モノレールにおける橋脚基礎の耐震補強

井上 美佐男・柏木 一夫・松木 聡

既設構造物の耐震補強としては橋脚の補強が優先的に実施されてきたが、近年、基礎に対する補強の必要性も高まっている。東京モノレールの橋脚の基礎については、杭基礎の耐震補強にあたり、営業線桁下低空頭、運河内で施工ヤード確保が困難という課題があった。これらの課題を解決するために「鋼殻補強コンクリート地盤改良工法」を開発した。本工法は、杭基礎の杭頭部を鋼殻及びコンクリートで補強し、杭地中部を地盤改良することで、杭の横抵抗を増大させ耐震性能を向上させる工法であり、東京モノレール杭基礎に適用し無事に施工を完了することができた。

キーワード：杭基礎、耐震補強、地盤改良、技術開発、鉄道工事

1. はじめに

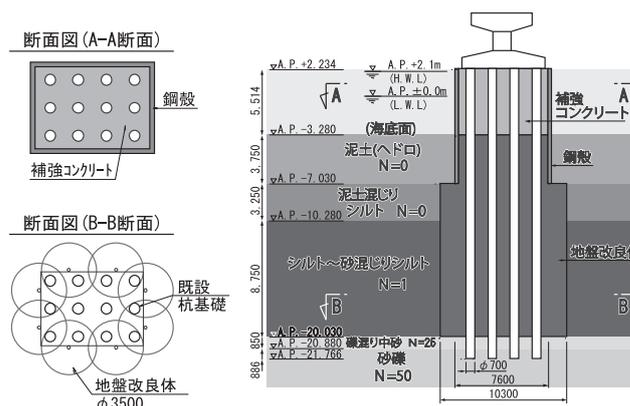
1995年に発生した兵庫県南部地震や2011年に発生した東北地方太平洋沖地震など、大規模地震の発生により、既設構造物およびその基礎に対する耐震補強の必要性が高まっている。しかし、都市部の鉄道橋脚の杭基礎の補強では、敷地制限や空頭制限等により施工方法が限定される。本稿では、東京モノレールの運河内橋脚基礎（写真—1）に対して、これらの課題を解決する耐震補強工法として開発された、杭基礎の杭頭部を鋼殻及びコンクリートで補強し杭地中部を地盤改良することで、杭の横抵抗を増大させ耐震性能を向上させる工法（以下、「鋼殻補強コンクリート地盤改良工法」と称する）の設計・施工について報告する。



写真—1 運河内橋脚基礎（東京モノレール）

2. 工法の概要

本工法は、群杭基礎に対する耐震補強工法である。本工法の構造概要及び地盤条件を図—1に示す。海底面から支持層までN値が0～1のヘドロ・シルト層が分布している。本工法は、杭頭部においては鋼殻と補強コンクリートから成る合成構造により杭頭部全体を一括して補強し、杭のせん断及び曲げ破壊に対する安全性を確保する。杭地中部においては高圧噴射地盤改良により杭周辺地盤を強化し、杭横抵抗と補強コンクリート下面地盤の鉛直抵抗の増大を図り、地震時の杭体発生応力を低減させ、杭のせん断及び曲げ破壊に対する安全性を確保する。



図—1 構造概要図および地盤条件

地盤改良は既設フーチングに架台を設置して行うため、地盤改良体の配置はドーナツ状配置となる。地盤改良体のラップ配置により補強後は一体型のケーソン基礎的な構造とすることができる。また、鋼殻は土留め・仮締切の機能を兼用するため、仮設材料のコストを軽減できる。

3. 工法の開発

(1) 設計法の検討

本工法は新しい構造形式であるため、設計法は既往の設計基準等に基づき構築する必要がある。ここでは東京モノレールの橋脚基礎へ適用を図るため、「鉄道構造物等設計標準・同解説」^{1), 2)} に準じた設計法を検討した。地盤改良後は基礎全体がケーソン基礎に近い基礎となり、振動モードが比較的単純でかつ非線形性を示す部位が明確となるため、非線形スペクトル法に基づいて設計を行う方針とした。非線形スペクトル法では、静的非線形解析から得られる等価固有周期及び降伏震度を用いて、所要降伏震度スペクトルにより応答塑性率を算定し、応答変位時の橋脚躯体や杭、地盤改良体の応答値を算定し耐震安全性の評価を行う。なお、構造成立性においては、「地震時の正負交番荷重により地盤改良体にひび割れが生じた場合でも圧縮耐荷性能が低下しないこと」が前提となるため、別途実験により検証している(3(2)を参照)。

(2) 実験による地盤改良体の性能評価

(a) 実験方法に関する検討

構造物を模擬した縮小モデルによる荷重実験は、規模的に周辺地盤を再現することが困難であった。そこで、図-2に示すように実構造物における圧縮応力が厳しくなる部位(評価対象部位)において、単純梁試験体で実構造物と同等の応力状態を再現できるか否かを2次元FEM解析により検討した(解析手法については、4(1)を参照)。その結果、梁状試験体の荷重位置(せん断スパン比)を工夫することにより、当該部位の応力状態を概ね再現できることを確認した。

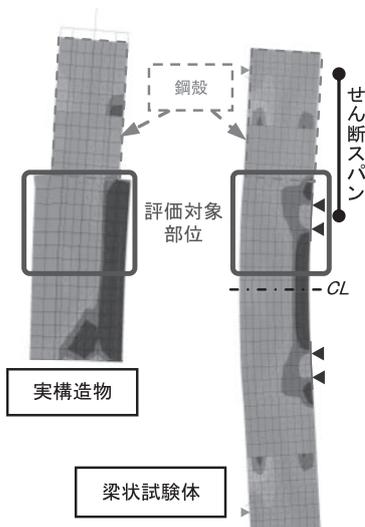


図-2 荷重位置に関する検討結果

(b) 試験体

試験体の概要、及び荷重位置を図-3に示す。試験体は、実構造物の約1/6の縮小梁状模型とし、断面は半断面分をモデル化した。試験体の形状寸法は、幅670×桁高950×長さ5,890[mm]とした。試験体の両端部には、厚さ2.0、長さ1,550[mm]の鋼殻を配置し、鋼殻内の930mmの範囲に補強コンクリートを、また620mmの範囲に地盤改良体(流動化処理土で製作)を配置した。試験体の内部には、実構造物におけるPC杭を模擬して、PC鋼棒(φ36、長さ5,790mm)を6本配置した(PC杭の軸剛性、曲げ剛性と等価とした)。試験体に用いた地盤改良体の荷重実験時における一軸圧縮強さは2.5N/mm²、補強コンクリートの圧縮強度は50.1N/mm²である。

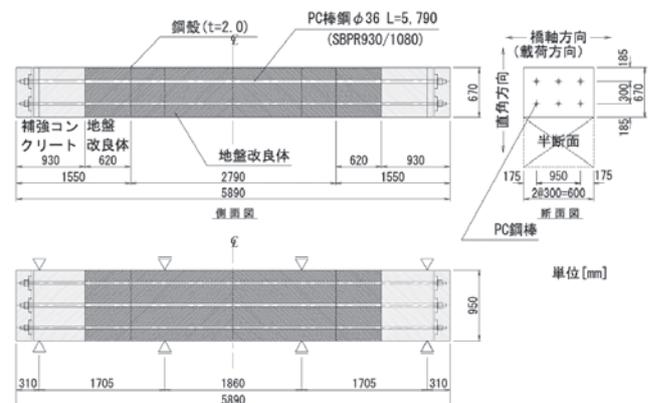


図-3 試験体の概要および荷重位置

(c) 荷重方法および計測項目

荷重方法を図-4に示す。荷重は、2次元FEMによる事前解析で算定した破壊荷重であるPd=183.6kNを基準にして、STEP①Pd/3=61.2、②Pd/2=91.8、③Pd/1.5=122.4、④Pd=183.6、⑤Pd×1.5=275.4、⑥Pd×2.0=367.2、⑦Pd×2.2=403.9、⑧Pd×2.4=440.6、⑨Pd×2.6=477.4[kN]と、全9ステップで段階的に荷重を増加させる方法で行った。ここで、FEMによる事前解析では、地盤改良体の設計基準強度を1.3N/mm²としている。また、荷重は各ステップで正負3回の繰返しで行った。計測項目は荷重荷

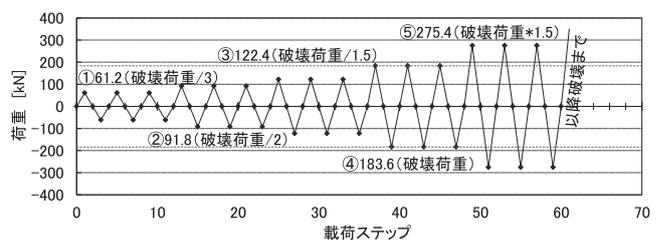


図-4 荷重方法

重、変位、地盤改良体のひずみ、鋼殻のひずみ、及び地盤改良体のひび割れ状況である。

(d) 実験結果

主要データとして、荷重と変位の関係、終局時（最終ステップ）におけるひび割れ状況を図-5及び図-6にそれぞれ示す。

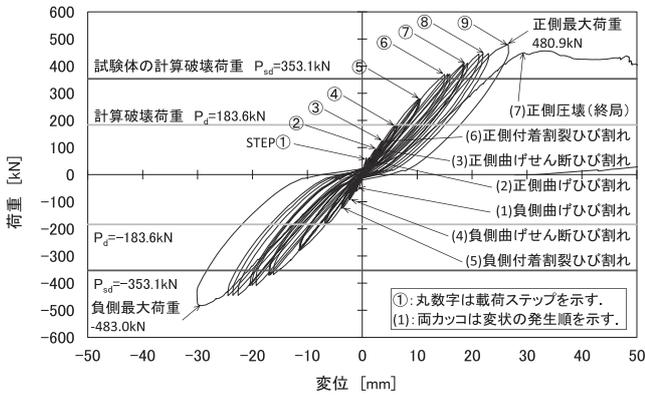


図-5 荷重～変位関係

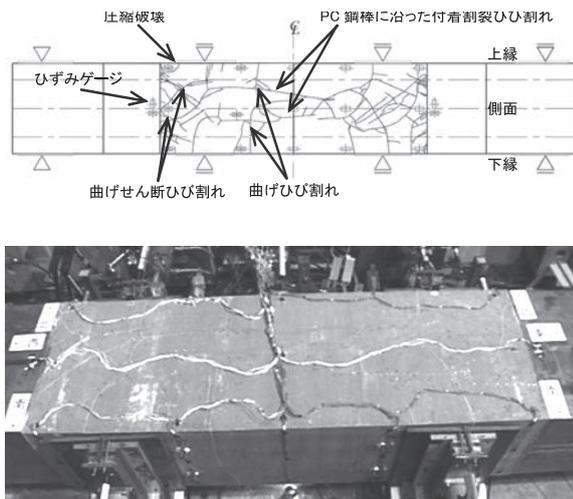


図-6 終局時における地盤改良体のひび割れ状況

①破壊状況

図-5及び図-6に荷重によって生じた地盤改良体の変状（ひび割れ、圧壊）を示す。荷重によりSTEP①の負荷荷の1回目に負側の曲げひび割れが生じた。次に、STEP①の正荷荷の2回目に正側の曲げひび割れが生じた。その後、STEP②のときに正、負の順番で曲げせん断ひび割れが、STEP③のときに正、負の順番でPC鋼棒に沿った付着剥離ひび割れが生じた。そして、最後にSTEP⑨の正荷荷の2回目に正側が圧縮破壊を起こし、終局に至った。終局状態においても脆性的な破壊は生じずに変形性能を有する粘りのある挙動が確認された。

②破壊安全度

地盤改良体の設計基準強度 1.3 N/mm^2 における設

計破壊荷重 P_d は、前述のとおり 183.6 kN である。一方、実験時における地盤改良体の一軸圧縮強さは 2.5 N/mm^2 であり、設計破壊荷重 P_{sd} は、 $183.6 \times 2.5 / 1.3 = 353.1 \text{ kN}$ とした（図-5）（解析は材料非線形性を考慮しているが、ここでは安全側の評価として比例計算（弾性体）で整理した）。この設計破壊荷重 P_{sd} に対して、実験における最大荷重は 480.9 kN であり、 $480.9 / 353.1 = 1.36$ の破壊安全度があることを確認した。

4. 東京モノレール橋脚基礎杭の耐震補強設計

(1) 解析モデル

解析法は、2次元FEMモデルによる材料非線形性を考慮した静的非線形解析とする。各要素構成及び断面を図-7に示す。橋脚、杭、フーチング及び前背面の鋼殻をビーム要素、補強コンクリート及び改良体をソリッド要素、側面の鋼殻をシェル要素としてモデル化する。地盤は、非線形ばねにてモデル化する。

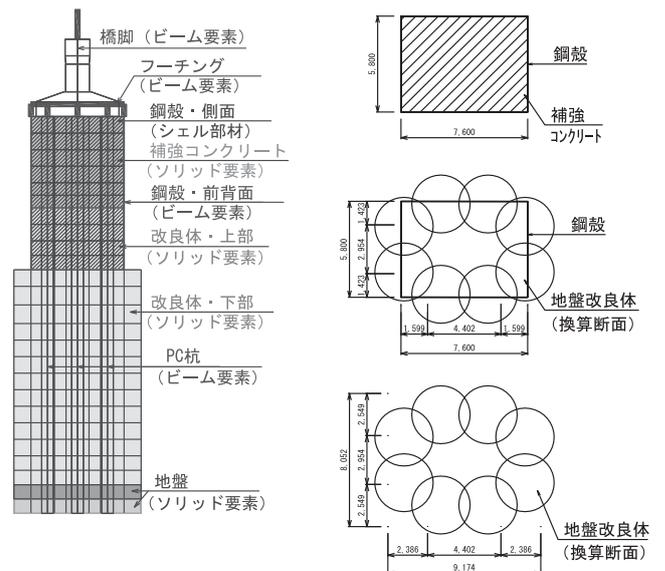
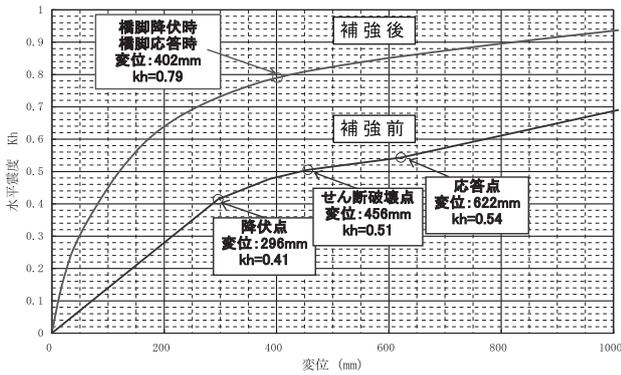


図-7 解析モデル図およびモデル断面図

(2) 耐震補強設計

東京モノレールの橋脚基礎に本工法を適用した場合の耐震補強効果について検討した。補強前後の水平震度～水平変位曲線を図-8に示す。補強前の構造の応答解析では、水平震度が0.4程度で降伏に至り、レベル2地震応答では水平震度が0.54、水平変位が622 mmである。降伏震度は、補強後の構造の応答解析では約0.8となり、補強前の約2倍に向上することが分かった。先行する破壊モードについても補強前は杭降伏であるが、補強後は橋脚降伏となり、修復性が向上する。



図一八 水平震度～水平変位曲線



写真一 鋼殻沈設状況

5. 本工法の施工

(1) 施工条件

本耐震補強工事で対象とする東京モノレール橋脚基礎は京浜運河に位置する。当該地点の水深は約4m、海底面から支持層(砂礫層)までの深度が約17mであり、フーチングを支持する杭の根入れ部を含めた杭全長は約22mである。また、営業線軌道直下で施工を行うため空頭制限は3mであった。

(2) 施工方法

図一 九に施工フローを示す。

(a) 鋼殻設置

鋼殻は1ピースの最大高さを700mmに分割し、全16段を現場で組みながら自重で沈設した(写真一 2)。設置深度は、杭頭部の補強と後述する地盤改良工で噴射された改良材の流出防止のために泥土層下端とした。泥土層の貫入抵抗が大きく沈設が困難な場合は、補助工法として鋼殻先端からのウォータージェットを併用した。鋼殻内側には、後述する地盤改良工のモニ

ター管の挿入および排泥回収のためのガイド管を設置している。当該管の直径は200mmとし、排泥が閉塞を起こさないことを事前に別所で実施した実規模試験で確認した。

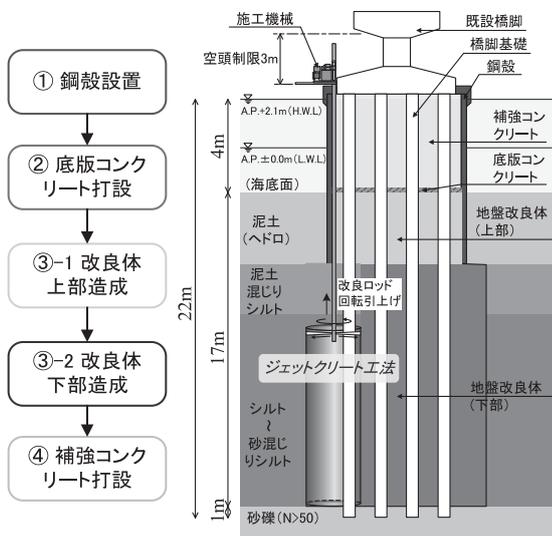
(b) 底版コンクリート打設

改良体上部造成時の排泥の噴発を防ぎかつ確実にガイド管に導くため、鋼殻内の海底面(泥土層上端)に厚さ150mmの底版コンクリート(水中不分離モルタル)を水中打設した。

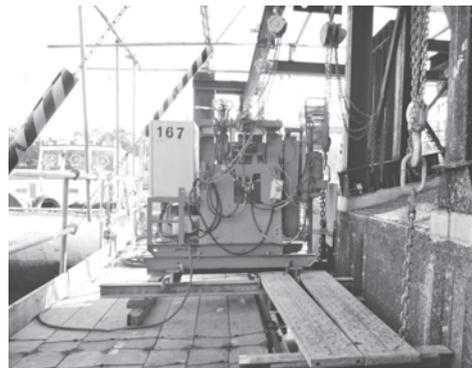
(c) 改良体(上部, 下部)造成

地盤改良工には高圧噴射攪拌工法に分類されるジェットクリート工法を採用した。本工法ではφ45mmのボーリングロッドに取付け可能な小型モニター管を用いており、従来の高圧噴射攪拌工法より施工機械(写真一 3)が小型なので、本工事のような狭隘空間においても施工に支障はなかった。

地盤改良体は、ジェットクリート施工中に発生する排泥の回収効率を考慮して、鋼殻内の泥土を先行して造成した(改良体上部造成)。また、施工によるPC杭への影響に配慮し、隣接する改良体の連続施工を避けるように配慮した順序で8本の改良体を造成した。粘性土地盤に高圧噴射攪拌工法を適用した場合、粘性の高い排泥が閉塞し、周辺地盤へ噴発することが懸念されたが、今回はガイド管を設置したことで排泥をスムーズに回収することができた。



図一 九 施工フロー



写真一 三 施工機械

(d) 補強コンクリート打設

底版コンクリート上部の鋼殻内をドライアップしてコンクリートを打設した。当該コンクリートには既設杭への荷重増加と鋼殻内での人力作業を回避するため軽量（比重 1.75）の高流動コンクリートを採用した。

(3) 改良体の品質評価

改良体造成から 28 日後以降に改良効果確認調査を実施した。コアボーリングは改良体中心から半径方向に 0.3 D（D は計画改良径 3.5 m）離れた位置で実施した。採取したコアの例を写真—4 に示す。コア採取率は平均で 95% 以上となり、深層混合処理工法での品質検査の目安となるコア採取率 90%³⁾ を上回る良好な状況であった。図—10 にコアの一軸圧縮試験結果を示す。設計基準強度 1.3 N/mm² に対して、一軸圧縮強さの平均値 q_u は 5.3 N/mm²（最小値 1.9 N/mm²）であった。また、改良体のコア強度と実大強度 Q_u に関する深層混合処理工法の技術指針³⁾によれば、 $Q_u = q_u - 1.3\sigma$ （ σ は正規分布を仮定した場合の標準偏差）とされており、試験結果から推定した実大強度 Q_u は 2.4 N/mm² となる。コア強度の変動係数は 42% であり、上式の適用範囲内であることから、実大強度は設計基準強度を上回っていると判断できる。なお、設計基準強度を下回るコア強度の発生確率

（不良率）は 5% 以下となった。ただし、工法の性質上、ばらつきが大きいことを考慮すれば、改良体全体系の強度特性に及ぼす強度のばらつきの影響を定量的に評価することは重要であると考えている。

変形係数については、 E_{50} が q_u の概ね 200 ~ 400 倍の範囲にあり、セメント改良土の一般的な関係と同様な傾向を示している。また、 E_{50} は平均 1602 N/mm²（ $\sigma = 664$ ）であり、設計値である 700 N/mm² を十分に満足している。

以上のように、ジェットクリート工法で要求性能を満足する高品質の改良体が造成できることを確認した。

6. おわりに

施工中は常時、軌道の変位を監視したが、施工による変位は生じず、営業線の運行に影響を及ぼすことはなかった。また、大型機械を必要としないジェットクリート工法の採用により、営業線直下の施工性と高品質な改良体の造成が可能であることを確認した。

JCMA

〈参考文献〉

- 1) 財鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説基礎構造物・抗土圧構造物，1997年3月
- 2) 財鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計，1999年10月
- 3) 日本建築センター：建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—，2002年

〔筆者紹介〕



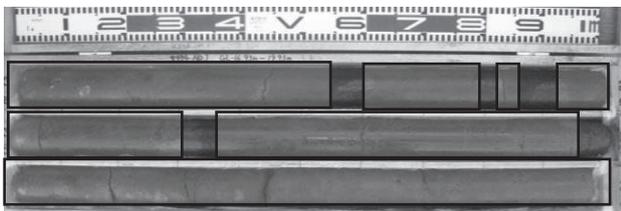
井上 美佐男（いのうえ みさお）
東京モノレール株式会社
技術・企画部
副部長



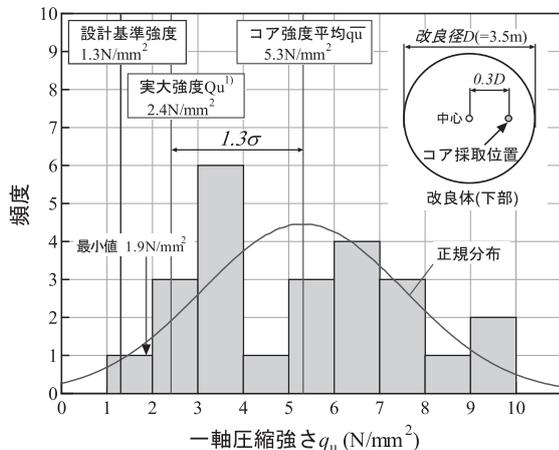
柏木 一夫（かしわぎ かずお）
モノレールエンジニアリング株式会社
技術部
担当部長



松木 聡（まつき さとし）
鹿島建設株式会社
土木設計本部構造設計部臨海・エネルギー施設 Gr
設計長



写真—4 採取した改良体のコアの例（フェノールフタレイン塗布）



図—10 一軸圧縮試験結果（ヒストグラム）